

Estabilización de subrasante loésica con silicato de sodio líquido

CRUZ María Pía ^{a,1}, MARTIN Italo ^a, PERRET Germán
^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba.*

Abstract. Esta investigación consistió en determinar la relación óptima para uso vial de la dosificación de silicato de sodio líquido con los sedimentos loésicos erodables de la provincia de Córdoba (Argentina). El silicato de sodio puede ser utilizado en la estabilización de suelos cuando se tiene presencia de sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, que al hidratarse producen un magnífico agente cementante. La utilización del silicato de sodio empleado para mejorar los materiales de construcción data de hace más de un siglo. Una de las últimas publicaciones al respecto fue de S. Moretto (2006)^[1] de la Universidad Católica de Córdoba, quien investigó al silicato de sodio líquido en la estabilización de loess colapsibles mediante un proceso de inyección in-situ del terreno. En esta oportunidad la aplicación responde a estabilizar subrasantes de caminos rurales erodables y acarcavados; representando éstos el 92% de la red vial total de la provincia de Córdoba según la Dirección Provincial de Vialidad (D.P.V.). La dosificación loess-silicato, garantizará una disminución de la erodabilidad superficial como del índice de plasticidad y, un aumento de la resistencia al corte no drenado.

Keywords. Estabilización, loess, silicato de sodio, subrasante.

1. Introducción

La iniciativa del grupo de investigación de geotecnia de la Universidad Católica de Córdoba (U.C.C.), consistió en determinar el porcentaje óptimo para uso vial de la dosificación de silicato de sodio líquido con los sedimentos inorgánicos loésicos erodables de la región mediterránea cordobesa (Argentina). El silicato de sodio puede ser utilizado en la estabilización de suelos cuando existen sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnífico agente cementante. Su aplicación responde a estabilizar subrasantes erodables y semisaturadas susceptibles de manifestarse en “caminos de tierras o red terciaria” de la región en estudio, **Figura 1**. Dentro del contexto vial, el 92% de la red vial total de la provincia de Córdoba corresponde a estos potenciales caminos sin pavimentar problemáticos, o sea contabilizándose unos 55.900 kilómetros según D.P.V. Por ende dicha dosificación apunta a garantizar una disminución de la erodabilidad superficial, como del índice de plasticidad y, producir un aumento de la resistencia al corte no drenado.

¹E-mail de contacto: mpcruz@ucc.edu.ar

Las subrasantes problemáticas sin pavimentar a estudiar del centro-este cordobés, corresponden a sedimentos finos del tipo loésicos – A4 ó A6– según American Association of State Highway and Transportation Officials (A.A.S.H.T.O.); manifestando, un variado comportamiento tenso-deformacional ante aumentos del contenido de humedad natural, grado de saturación, tensión de corte, tensión normal media y presión de poros según Zur y Wiseman(1973)^[2].

En esta región el clima, tiene características que van de templado a semiárido y el ciclo de precipitaciones importantes se manifiesta en la época de primavera-verano; produciéndose una gran acumulación del agua superficial sobre las subrasantes con insuficiente perfilado del bombeo transversal o drenaje lateral. Por ende, se forman baches, acarvamientos o subsidencias localizadas a lo largo de toda la traza. Estas subrasantes loésicas erodables, quedan casi intransitables para el tránsito de cualquier tipo vehículo (pesado o liviano) con o sin carga. Posteriormente la alternancia de épocas de otoño-invierno secas y ventosas, aportan una sequedad ambiental a estos caminos no pavimentados generando, una alta presencia de polvo ambiental al rodar cualquier vehículo; siendo técnicamente, aminorado su peso unitario seco ($1,1 \text{ tn/m}^3$ a $1,2 \text{ tn/m}^3$) y agotada la resistencia al corte intergranular de los sedimentos estudiados ($0,20 \text{ kg/cm}^2$ a $0,25 \text{ kg/cm}^2$) cuyo diámetro de partículas analizadas ronda entre 0,060 mm hasta 0,002 mm de acuerdo con Rinaldi et. al. (2011)^[3].



Figura 1. Subrasante natural erodable en la comuna de Los Cedros a 15km de Córdoba Capital.

2. Estado del arte de suelos con silicatos

La utilización del silicato de sodio como agente utilizado para mejorar los materiales de construcción data de hace más de un siglo. Johann Van Fuchs, quien fue pionero en la comercialización de silicatos solubles, propuso a comienzos del siglo XIX la utilización de los silicatos solubles como un elemento que favorecía el endurecimiento de piedras artificiales. Alrededor de 1910, el silicato de sodio comenzó a ser utilizado como agente impermeabilizador. En efecto, se aplicaba una solución de silicato de sodio con la posterior adición de silicato de calcio o bien de aluminio, en los bacheos de un camino. Albert Francois en 1915, encontró que la efectividad de una inyección cementicia líquida en micro perforaciones podía incrementarse en el tiempo, si se la mezclaba con silicato de sodio. Concluyendo en su investigación que cada micro perforación realizada, tenía silicatos gelatinosos de calcio insolubles rigidizando puntualmente la matriz de suelo que la rodeaba. Este método de inyección con mezclas vertidas, ha sido utilizado extensamente en fundaciones y en el control de la infiltración de suelos, pero el método es poco práctico en cuantificar el tiempo para garantizar una

distribución homogénea de la gelificación en profundidad, y, no se garantizan óptimos resultados en los primeros metros de profundidad desde el nivel de terreno natural.

Finalmente en 2006, el tesista de grado de U.C.C., Sebastián Moretto, dirigido por el profesor Ingeniero Civil Carlos Arnaudo, estudió la estabilización de suelos loésicos locales colapsibles con carbonatos de calcio en su matriz, mediante inyecciones a base de silicato de sodio en zonas rurales del interior provincial cordobés. Cabe recordar que el silicato de sodio reacciona ante la presencia de sales de calcio, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles en forma de cristales, los cuales al hidratarse producen un agente cementante con “cierta” durabilidad en el tiempo.

3. Metodología

A partir de las limitaciones mencionadas del método de inyección a base de silicato de sodio en suelos, se planificó realizar estabilizaciones con mezclas de baja relación agua/silicato o sea mezclas aptas para ser consideradas de uso civil como un suelo vial.

La caracterización geotécnica-vial de los sedimentos a estabilizar, implicó la planificación de dos etapas de ensayos; siendo, la primera sobre muestras de suelo loésico en estado natural, y la segunda sobre probetas de suelo loésico con silicatos de sodio líquido. Cabe mencionar que las muestras de suelos estudiadas, corresponden a la planicie loésica inorgánica del campus de la U.C.C.; cuyo rango de profundidades estudiadas varía entre 0,5m a 1,0m desde el actual nivel de terreno natural (o sea 378 metros sobre el nivel del mar). El posicionamiento global responde a la latitud ($31^{\circ}29'17.21''S$) y longitud ($64^{\circ}14'20.94''O$); cuyo ingreso principal es por la Avenida Armada Argentina o Ruta Nacional 5.

En cuanto a la primera etapa se ejecutaron ensayos de: contenido de humedad (ASTM D 2216)^[4], lavado tamiz 200 (0,075mm) (ASTM D 1140)^[4], ensayos granulométricos (ASTM D 422)^[4], límites de Atterberg (ASTM D 4318)^[4], doble hidrómetro (ASTM D 4221-909)^[4], superficie específica (Santamarina *et al.* 2001)^[5], ensayo proctor estándar/T99 (ASTM D 698, ASTM D 1557)^[4], ensayo California Bearing Ratio con hinchamiento ($CBR_{2,5mm}$)(ASTM D 1883)^[4], determinación química del contenido de carbonato de calcio(método calcímetro Scheimble)^[6] y pH (Potenciometría en agua 1:2,5, con tiempo de reposo 2hr)^[6]. Mientras que en la segunda, se realizó inicialmente el estudio de la fase líquida óptima (**Figura 2**) y el estudio de dosificación de suelo loésico con silicato de sodio líquido para una aplicación de uso vial; esto último implicó realizar a cada dosificación analizada el ensayo de compresión simple desde probetas remoldeadas elaboradas al peso unitario seco máximo (γ_{ssmax}) según el contenido de humedad óptimo ($\omega_{\text{óptimo}}$) de los respectivos ensayos proctor estándar o T99, **Figura3**. Cabe aclarar que el suelo natural estudiado tiene un ángulo de fricción interna bajo, por lo que para el ensayo de compresión simple se asumió que la resistencia al corte no drenado sería la misma que la resistencia a compresión simple, de esta manera se estaría siendo conservador por despreciar la fricción interna del suelo. Luego se seleccionó la mejor dosificación suelo-silicato; siendo, los criterios determinísticos de selección: no ser erodable, disminuir el índice de plasticidad e incrementar la resistencia al corte no drenado con respecto al estado natural del suelo. En la **Figura 4** se observa el gráfico resultante del ensayo de compresión simple en una probeta de suelo natural, respecto, de la dosificación óptima a distintos tiempos de curado.

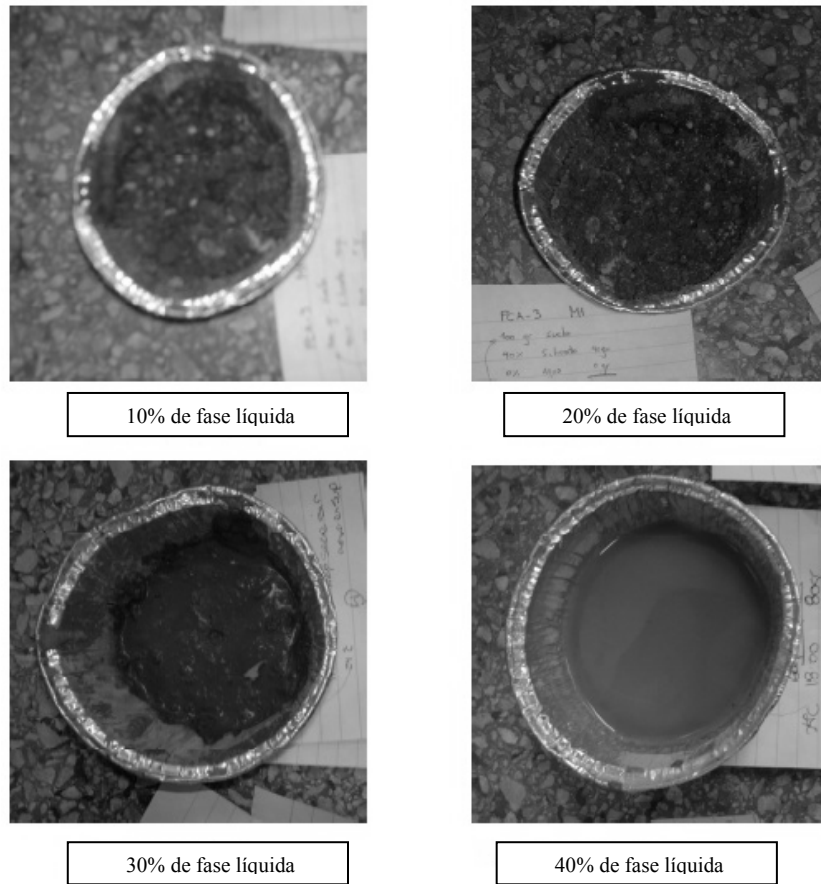


Figura 2. Determinación de la fase líquida.



Figura 3. a) Probeta de silicato de sodio en estado puro y sólido (cristalizado), b) Cuarteo de loess erodable y c) Rotura de probeta estabilizada loess-silicato en el ensayo de compresión simple.

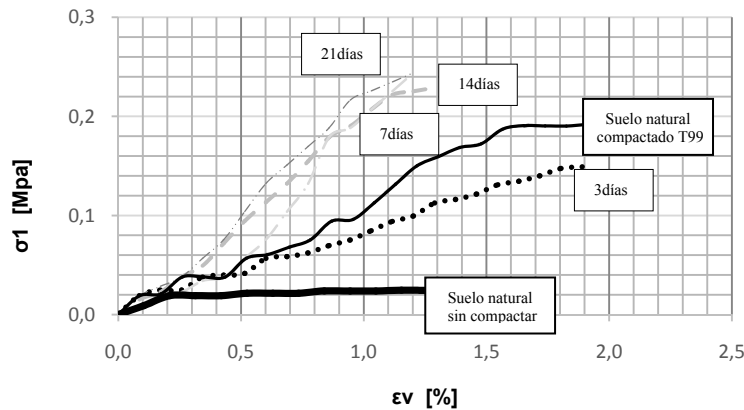


Figura 4. Gráfico resultante del ensayo de compresión simple en una probeta de suelo natural respecto de la dosificación óptima (1S:2A:10L) a distintos tiempos de curado; siendo S: silicato, A: agua y L: loess.

Finalmente a dicha dosificación óptima, se le determinó el índice de CBR $_{2,5mm}$ con medición del hinchamiento a 4 días según norma ASTM D1883^[4] y, a 11 días según comentarios de Hurley (1971)^[7]. Cabe destacar que la determinación de dejar la probeta de CBR en inmersión hasta los 11 días, fue para garantizar un mayor tiempo de reacción del silicato de sodio con el carbonato de calcio de la matriz de suelo; siendo la consecuencia de dicha reacción la formación de silicatos gelatinosos de calcio insolubles, que al hidratarse producen el citado agente cementante. En la **Figura 5** se observan los gráficos resultantes del ensayo CBR con medición de hinchamiento a 4 días y a 11 días; siendo la sobrecarga utilizada de 44 newton en ambos ensayos.

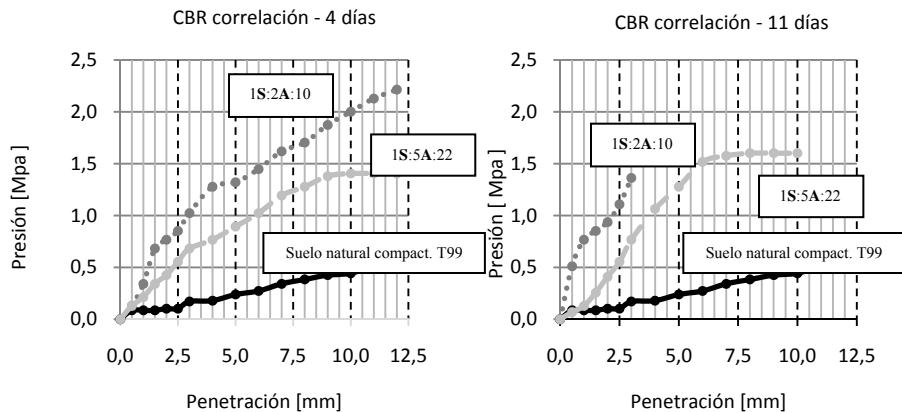


Figura 5. Gráficos resultantes de los ensayos de CBR con medición de hinchamiento en una probeta de suelo natural respecto a dos dosificaciones analizadas a 4 días y a 11 días de curado respectivamente.

Cabe aclarar que solamente se realizaron los ensayos CBR en dos dosificaciones - 1S:2A:10L y 1S:5A:22L. Ya que la primera de estas cumplía con los tres criterios determinísticos o sea no ser erodable, disminuir el índice de plasticidad e incrementar la resistencia al corte no drenado con respecto al estado natural del suelo. Mientras que la segunda era recomendada por Hurley (1971)^[7].

4. Características geotécnicas del suelo y las dosificaciones estudiadas

Para obtener una estructura estable en el tiempo con los suelos loésicos, existen distintos procedimientos. Uno de ellos consiste en modificar las propiedades del suelo mediante la estabilización para hacerlo capaz de cumplir un requerimiento técnico-operativo según Ingles y Metcalf(1972)^[8].

En este estudio, se trata de una estabilización química y mecánica de los suelos; siguiendo el procedimiento: 1° Identificar la problemática del suelo estudiado. 2° Dosificar el porcentaje óptimo de silicato de sodio líquido con el suelo estudiado para un uso vial. 3° Determinar la dosificación óptima. 4° Garantizar el tiempo de curado mínimo in situ antes de la puesta en uso por tránsito.

En la **Tabla 1**, se resumen las principales características geotécnicas del suelo natural erodable a estabilizar, comode las distintas dosificaciones analizadas del suelo con el silicato de sodio líquido.

Tabla 1. Principales características del suelo erodable y las respectivas estabilizaciones analizadas.

Nombre del ensayo	Parámetros (unidad)	Suelo natural	Dosificación				
			(S) silicato de sodio : (A) agua : (L) loess **: L				
Identificación	A.A.S.H.T.O. :	A4	1S:2A:10	1S:4A:18	1S:5A:22	1S:6A:28	1S:8A:38
Lavado tamiz 200	ω_{T200} (%)	99	84	86	87	88	92
Análisis granulométrico	Grava (%)	0,00	0,67	0,50	0,17	0,17	0,17
	Arena (%)	2,00	15,00	13,17	12,50	11,50	7,33
	Limo y Arcilla (%)	98,00	84,33	86,33	87,33	88,33	92,5
	D ₁₀ (mm)	0,17	0,125	0,15	0,16	0,15	0,125
Límites de Atterberg	ω_{LL} (%)	22,6	27,4	24,6	27,7	21,8	25,1
	ω_{LP} (%)	20,0	25,0	22,2	25,0	19,1	22,2
	IP (%)	2,6	2,4	2,4	2,7	2,7	2,9
Doblehidrómetro	Erodable	Sí	No	No	No	No	Sí
Sales solubles totales	Sales solubles (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Superficie específica	Se (m ² /gr)	0,61	1,08	NE	0,82	NE	NE
Carbonato de calcio	CaCO ₃ (%)	1,6	2,3	3,2	3,0	3,0	2,9
pH	()	8,3	9,8	9,6	9,5	9,4	9,3
Proctor estándar	$\omega_{\text{óptima}}$ (%)	17,5	23,0	22,0	21,5	20,0	19,0
	$\gamma_{\text{ssmáx}}$ (kg/m ³)	1.660	1.480	1.500	1.530	1.530	1.550
California Bearing Ratio	IndCBR 4 días (%)	1,48***	12,35	NE	8,03	NE	NE
	Hinchamiento (%)	-0,6***	+4,5	NE	+3,6	NE	NE
	Ind CBR 11 días (%)	1,48***	16,06	NE	8,03	NE	NE
	Hinchamiento (%)	-0,7***	+5,0	NE	+3,8	NE	NE

Tabla 1. Principales características del suelo erodable y las respectivas estabilizaciones analizadas (cont).

Nombre del ensayo	Parámetros (unidad)	Suelo natural	Dosificación				
			(S) silicato de sodio	(A) agua	(L) loess	**:	
Identificación	A.A.S.H.T.O. :	A4	1S:2A:10 L	1S:4A:18 L	1S:5A:22 L	1S:6A:28 L	1S:8A:38 L
Compresión simple*	S _u (MPa)	0,013	0,122	0,121	0,107	0,121	0,122
	E _{1%} def. vertical (MPa)	2,35	22,16	10,00	11,47	7,35	23,83

NE: No Ensayado.NC: No Corresponde ser ensayado.

Ind: Índice.

*: En el caso de los ensayos de compresión simple de probetas de suelo-silicato, las mismas fueron curadas 21 días antes de ser ensayadas a la compresión simple. **: Relación en peso.*** A partir de ensayar el suelo natural compactado al peso unitario seco máximo (γ_{ssmax}) y contenido de humedad óptimo (ω_{optimo}) del ensayo proctor estándar o T99.

-: Contracción

+: Expansión.

5. Conclusiones

- Los sedimentos finos que conforman las subrasantes estabilizadas erodables de la planicie loésica centro-este de Córdoba, pueden clasificarse como A4 según el sistema de clasificación de suelos viales A.A.S.H.T.O.
- El agente utilizado para estabilizar química-mecánicamente las subrasantes loésicas erodables cordobesas, fue el silicato de sodio líquido (Na_2SiO_3).
- Para el presente trabajo se estudiaron diversas dosificaciones: 1S:2A:10L, 1S:4A:18L, 1S:5A:22L, 1S:6A:28L, 1S:8A:38L, siendo S el silicato de sodio líquido, A el agua potable y L el loess. La relación óptima del silicato de sodio líquido, mezclado con los sedimentos inorgánicos, resultó ser 1S:2A:10L (relación en peso).
- Esta dosificación de silicato de sodio líquido con los sedimentos erodables aplicada para uso vial, lograría garantizar: eliminar la erodabilidad, bajar el índice de plasticidad un8%,y aumentar la resistencia al corte no drenado un938%. Además de aumentar el índice $\text{CBR}_{2,5\text{mm}}$ ante hinchamientos un1085% para un tiempo de curado de 11 días. Por ende, las principales ventajas desde la perspectiva vial de utilizar dicha estabilización en subrasantes no pavimentadas erodables son: “disminuir” la vulnerabilidad a la erodabilidad a corto plazo, “reducir” la cantidad de polvo ambiental como de baches y acarcavamientos en la zona de ancho de camino y, “aminorar” los costos de mantenimiento y rehabilitación anual en dichas vías no pavimentadas.

Referencias

- [1] Moretto S., *Estabilización de suelos loésicos colapsibles mediante inyecciones a base de silicato de sodio*, Córdoba, 2006.
- [2] Zur A. y Wiseman G., *A Study of Collapse Phenomena of an Undisturbed Loess*, 8° International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2.2, Session 4/43, pp.265-268, Moscú, URSS, 1973.
- [3] Rinaldi V. A., Cruz M. P., Capdevila J. A. y Clariá J. J., Origen y caracterización de la estructuración de un loess pampeano, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* **12** (2012), 60-68, ISSN 1936-1483 (on line), 2011, Disponible en <<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/336/347>>, último acceso 4 de junio de 2015.
- [4] Normas ASTM. *Annual book of ASTM Standards*, section 4 construction, volume 04.08, Soil and rock, dimension stone, geosynthetics, publication code number (PCN): 01-040892-38, Philadelphia, 1992.
- [5] Santamarina J. C. y Narsilio G.A., *Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2001.
- [6] Cotín A., *Investigación de suelos, Método de laboratorio y procedimientos para recoger muestras*, Editorial Trillas, México, 1976.
- [7] Hurley C. H., *Sodium Silicate Stabilization of soils-A review of the literature*, University of Illinois, Chicago, 1971.
- [8] Ingles O. G. y Metcalf J. B., *Soil stabilization: principles and practice*, Vol. VII, pp. 374, Butterworths, Sydney, 1972.